

以填充式氣提塔處理水中揮發性有機物

Removal of VOCs in Water By Packed Tower Stripping Process

*蔣本基 **馬健雄

壹、引言

揮發性有機物(Volatile Organic Chemicals VOCs)普遍存在於各水體中，而許多含氯VOCs被懷疑會引起人體基因的致突變性及對器官具毒性，故愈來愈受到各界的重視。由US.EPA之資料顯示，傳統淨水程序無法有效處理此類揮發性物質。因此，本研究探討以填充式氣提塔(Packed Tower Stripping Process PTSP)處理水中微量VOCs的特性。在實驗室中選用了八種典型的含氯VOCs分別探討其不同揮發度有機物種類，氣液比及液體負荷等因素對去除效率的影響。比例，並比較由國內所製造四種填充物的質傳效率，並以此結果修正Onda模式，以作為設計之模擬。最後以一組放大型之PTSP處理自來水的THMs，以探討放大設計對質效率的影響及驗證修正Onda模式。

貳、文獻回顧

一、水體中揮發性有機物

存在於水體中之VOCs，來源可由自然界，人造化合物及化學反應所形成；其中以工業常用之含氯有機溶劑的污染量最大。據Westrick J.(1984)等報告，在美國466個地下水源中，除THMs外，以三氯乙烯，1,1,1-三氯乙烷、四氯乙烯及1,1-二氯乙烷最常出現。而據本省環保處蔡氏(1988)等分析各地下水源，在58個樣品中，有91.4%含有微量氯仿及三氯乙烷。一般地下水源由於再曝氣能力低，故較地表水中VOCs含量高(US.EPA 1983)。但據馬氏(1990)分析所得，基隆河中VOCs種類及濃度均較其它地下水及河水中的多及高。

除工業污染、儲漏、家庭排出、垃圾掩埋及化糞池等主要VOCs污染源外，淨水廠中加氯消毒也會引起VOCs污染的問題(洪氏1989, Keith 1980)。而最新的US.EPA對1986年安全飲用水水質標準修正案中，VOCs的種類由原先列營的八種增加至十四種(Pontius F.W.1990)，大部份的最大污染物濃度(Maximum Contaminant Level MCL)為5ug/l。

*台灣大學環境工程學研究所教授

**經濟部工業局工業污染服務團工程師

在處理技術方面，則有GAC及PTSP被認為是最佳可用技術(Best Available Technologies BAT)，但對於Vinyl Chloride 來說，則只有PTSP是BAT。

二、填充氣提塔處理水中VOCs的理論與應用

填充式氣提塔依水及氣體的流動方向，可分為對流式(Counter-Cuuent)，共流式(Co-Current)及交流式(Cross-Current)三種，在研究及實際應用方面多採用對流式。基本理論是應用溶質在氣液間的平衡現，象由濃度差所造成的推動力，把溶質從液相中移到氣相內而達到處理的效果。在數學模式處理時，對流式填充氣提塔的基本假設為：

1. 槽內為等溫系統，即不考慮由溫度梯度所造成之熱質及質傳機構。
2. 容積總質量傳送係數(K_{La})在每組操作條件下為固定值，不隨槽塔高度而改變。
3. 在兩相界面中，溶質達平衡的狀態，可利用亨利定律(Henry's Law)來描述。
4. 不考慮槽內可能發生之吸附及脫附機構。
5. 不考慮溶質系統的傳送影響，假設跟單質的傳送機構相同。
6. 穩態下的操作，故沒有溶質、溶液在槽內累積。
7. 氣液兩相在槽塔內均以柱塞流(Plug Flow)之流體運動方式移動。
8. 考慮為稀釋(Dilution)溶液來處理，即無濃度效應。

圖(1)是一PTSP的示意圖，由對流質傳公式，在微分容積(ΔV)的溶質流量 dN ：

$$dN = k_{La} \cdot (C_1 - C_1^k) \cdot A \cdot Z \quad - (1)$$

而單位時間內，單位總面積(填充物面積)之質量變化為：

$$\frac{-dm}{dt} = -d(Q_1 \cdot C_1) \cdot A = K_{La} \cdot (C_1 - C_1^k) \cdot dZ \cdot A \quad - (2)$$

$$\therefore d(Q_1 \cdot C_1) = K_{La} \cdot (C_1 - C_1^k) \cdot dZ \quad - (3)$$

式中： K_{La} ：容積總質傳係數 (1/sec)

Q_1 ：水流流量 (m³/sec)

C_1 ：溶質在水中濃度 (g/m³)

C_1^k ：溶質在水中之平衡濃度 (g/m³)

A ：槽塔之斷面面積 (m²)

m ：微分容積內之溶質質量 (g)

N ：溶質質量通量 (g/sec)

由 ΔV 的質量平衡關係及Henry's定律代入(3)式再積分，再假設進流空氣中溶質濃度為零($L_{g1}=0$)，可得：(Kawanaugh 1980)

$$Z = \left(\frac{L_m}{K_{La}} \right) \frac{1}{1-A} \ln \left[\frac{C_{12}}{C_{11}} \cdot (1-A) + A \right] \quad - (4)$$

式中：Z：槽塔之高度(Packing 高度) (m)

L_m ：液體負荷 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$)

C_{12} ：進流水中溶質濃度 (g/m^3)

C_{11} ：放流水中溶質濃度 (g/m^3)

A：吸收因子，式中 $A=Q_1/(Q_g \cdot H_c)=1/\text{氣提因子}$

Q_1, Q_g ：液體及氣體流量 (m^3/sec)

H_c ：無因次亨利常數 ($\text{mg}/1/\text{mg}/1$)

容積總質傳係數可由公式(4)：

$$K_{La} = \frac{\ln [C_{12}/C_{11} \cdot (1-A)+A]}{Z \cdot (1-A)/L_m} \quad - (5)$$

K_{La} 值可經由實驗求取，亦可經由半經驗公式(Empirical formula)求得。由雙薄膜理論可知：

$$\frac{1}{L_L} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_g \cdot H_c} \quad - (6)$$

式中： K_L ：總質傳係數 (m/sec)

K_1 ：液膜質傳係數 (m/sec)

K_g ：氣膜質傳係數 (m/sec)

而由Onda模式可從 K_1 及 K_g 計算出 K_L 值來(Onda 1968)

$$K_1 = 0.0051 \left(\frac{L_m}{a \mu} \right)^{2/3} \left(\frac{\mu_e}{\rho_e D_e} \right)^{-0.5} \\ (a_t d_p)^{0.4} \left(\frac{\rho_e}{\mu_g} \right)^{-1/3} \quad - (7)$$

$$K_g = 5.23 \left(\frac{G_m}{a_t \mu_g} \right)^{0.7} \left(\frac{\mu_g}{\rho_g D_g} \right)^{1/3} \\ (a_5 \cdot d_p)^{-2} (a_t \cdot D_g) \quad - (8)$$

式中之濕比表面積 'a'

$$a = a_t \left[1 - \exp \left(-1.45 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_l} \right)^{0.75} \left(\frac{L_m}{a_t \mu_l} \right)^{0.1} \right. \right. \\ \left. \left. \left(\frac{L_m^2 \cdot d_t}{\rho_l^2 \cdot g} \right)^{-0.05} \left(\frac{L_m^2}{\rho_l \mu_l a_t} \right)^{0.2} \right] \right]$$

D_g 可由Hirschfelder模式求取，而 D_e 則可用Wike-Chang Correlation (1955)液相中分子擴散係數模式求取。Onda內各項參數數值及計算方法可參考Gosset(1985)或馬氏(1990)。

K_{La} 值受溫度，氣、液負荷、填充物特性的影響而變化。Gosset(1985)的實驗結果，溫度在10° C至30° C時， K_{La} 值與溫度成線性關係，而Haniott(1989)則以每增加1° C時， K_{La} 上升2.4%來修正 K_{La} 值。液氣負荷主要影響填充物對水的截留(Holdup)效果，即質傳面積及薄膜的厚度(Shulman 1955)。

PTSP在美國常被使用於地下水去除有機溶劑外(Hand 1987, Umphres 1983)也應用於處理水中引起臭味的物臭：如引致水中泥土嗅(Earthy)及Musty味的Geosmin，2-methylisobornol等(主要由水中藍綠藻及Adinomyceles代謝所產生的物質)；此外也有2-isobutyl-3-methoxypyrazine，2-isopropyl-3-methoxy pyrazine及2,3,6-trichloroanisole等，引致嗅味的微量有機物(Lalezary 1984)。US.EPA(1987)調查177個正在操作的PTSP，主要於地下水，表面水，自來水及垃圾滲出水，其中VOCs污染物有：

Aniline, Benzene, Bromoform, $CHBr_2Cl$, $CHBrCl_2$, CB, Dichloroethylene, Diisopropyether, Ethylbenzene, Ethylene Dichloride, M.C., Methyl Ethyl Ketone, 2-Methylphenol, Methyl Tertiary, Perchloroethylene, Phenol, 1,1,2,2, TEA, TCA, Butylether, TCE, 1,2,3-Trichloropropane, Tol, Xylene 等。

PTSP除對水中VOCs具有高度處理能力外，操作費則僅為GAC的一半(EPA 19 87, Clark 1988)。Mckinnon (1984)在GAC程序前加入PTSP，可增加VOCs的處理效率，同時也可降低1/3至1/2的操作費用，但VOCs經由液相中氣提後，會移轉成為氣相中的污染物質。但一般認為微量毒性有機物進入大氣，經稀釋及光解作用，尚不致於危害環境及人類的健康(McCarty 1980)。

參、實驗設備及方法

一、VOCs檢驗設備及方法

8種VOCs的分析：

實驗中8種VOCs分析方法是溶劑萃取再以GC分析。萃取以水樣比n-Pentane=20:1，置於50ml之Pyrex試管內蓋以有Teflon襯裡之螺蓋，然後以每分鐘100次振動之頻率萃取20分鐘，取出之n-Pentane萃取液置於2ml之小瓶(Vial)內，用附有Teflon塞片的鋁蓋密封後，送至GC分析。

分析儀器是使用HP-5890A Series II型GC配以HP-7673A自動採樣器及自動注射裝置，每次自動注入1 μ l溶劑進行分析。GC的檢測器是ECD，操作溫度為300 $^{\circ}$ C，混合氣體N₂流速30ml/min，注射器是填充式的，溫度250 $^{\circ}$ C；攜帶氣體流速為10ml/min，層析管使用Vocol 0.53mm ID毛細管(Supelco)。烘箱的溫度是初溫50 $^{\circ}$ C停留3mins，再以8 $^{\circ}$ C/min加溫至160 $^{\circ}$ C。GC訊號以HP-3396積分儀處理。圖(2)是標準品的GC圖，標準品是在實驗室內自配。其中Bromoform是添加作為Surrogate，以判斷在整個分析過程中是否出現漏失及污染的情況。

二、填充式氣提塔實驗設備與方法

1. 填充氣提塔的實驗設備

填充塔主體是以透明壓克力材料製成，總高度約240cm，直徑15cm即斷面積0.01539(m²)，分成五節，中間三段每段高約61cm，置放填充物。進流水以400l水桶盛裝，用抽水機(Masterflux 6~600rpm)抽至塔頂。而空氣則以壓縮機(復盛工業：VA51及VA65)送出，經流量計活性炭管柱及過濾後由槽底進入。整組設備示意於圖(3)內。本實驗共選擇了四種填充物作物模式的探討，四種填充物的編號由#1至#4，分別是馬鞍型，馬鞍齒型、梅花型及海膽型，材料是Polypropylene(PP)，均在國內製造(基隆企業有限公司)。四種填充物的外型及廠商提供的特性資料見圖(4)及表(1)。

2. 填充塔的實驗方法

實驗之進流水是以自來水，再加定量8種VOCs製成。而自來水先經過65cm高之活性炭柱吸附處理後，再以濾料過濾後才使用。8種VOCs分別溶於水中。造成飽和溶液過濾後儲存於密封之茶色瓶內。使用時先經定量，然後分別取出適量之VOCs飽和液溶於前配製之自來水中，以作實驗進流。填充塔操作時，先用處理後的自來水及空氣沖洗，若槽內溫度保持在20 \pm 0.5 $^{\circ}$ C，即可開始實驗。處理水進流後，待水量及空氣流量控制達到穩定後，再經15分鐘或2個空槽體積後，由各斷面抽換二次後，採出約50ml水樣，然後再取20ml進行分析。

3. 填充氣提塔處理自來水中THMs的設備及方法

本實驗的氣提塔高約210cm，直徑為24cm，以壓克力透明膠製成，內填充137cm高之馬鞍型填充物，其餘進水及空氣等設備跟(2)節的類似。

實驗時直接使用實驗室內的自來水，並以四種THMs作為VOCs探討對象。THMs的分析是使用Purge & Trap - GC，除GC的溫度程式控制在初溫50° C維持3分鐘後以每分鐘上升8° C到150° C，其它Purge & Trap及GC的設備及操作方詳見馬氏(1990)。THMs的標準品是使用Supelco公司的混合THMs，標準GC見圖(5)，圖中四種THMs的濃度分別為1 μ g/l。

肆、結果與討論

1. 容積總質傳係數之測定

表(2)係說明本實驗中的使用的四種填充物及各種實驗參數的操作條件，除在馬鞍型實驗中共求得104個容積總質傳係數實驗(K_{La})_e外，其餘三種填充物在各操作條件下各共有96個(K_{La})_e值。

由公式(5)，代入各槽高之VOCs濃度，然後以直線型迴歸，可求得在各種氣液負荷，填充物及不同VOCs種類之實驗容積總質傳係數(K_{La})_e。圖(6)是1，1-DCE在液負荷為3.45kg/m²·s，氣負荷為0.157 kg/m²·s而填充物是#1時，由7組數據(包括進流及放流濃度)迴歸後，由斜率所得之(K_{La})_e值。

2. K_{La} 實驗值與Onda模式預測值之比較

由各種操作參數資料，可求得Onda模式的(K_{La})_o模擬值。

圖6是以#2填充物所進行實驗之結果，雖然Onda預測的(K_{La})_o相對於(K_{La})_e有較高之現象，但由整體觀察兩者間仍有具一致性。四種填充物的Onda預測結果都較實驗值大，對於#4填充物的更有明顯偏高之趨勢，這由於#4的比表面積最大，故計算的有效質傳面積因而較大。但由實驗結果#4的質傳效率或(K_{La})_o值在四種填充物中卻普遍較低。四種填充物中，以#1及#2填充物的形狀較接近Onda研究時所使用之填充物種類(Onda 1965)，故可能使實驗結果(K_{La})_e較接近(K_{La})_o預測值，但質傳效率較標準的填充物低。由於Onda模式是半經驗公式，各常數項是實驗值經迴歸分析求得，故祇對某些填充物如Pull Rings, Berl Saddles等具相當良好之預測性，但對於一些新型填充物就可能不太合用(Speece 1987)。

3. 容積總質傳係數實驗值(K_{La})_e與Onda模擬值(K_{La})_o的關係

由三種經驗模式，以統計迴歸方法，求取(K_{La})_e及(K_{La})_o的關係，以提供作為模擬

預測的數計。三種模式的迴歸結果及模式方程式列於表(3)中。其中模式(Ⅲ)是修正公式(7)及(8)前之常數項。四種填充物都可由其中某種修正公式獲得良好的相關，但以#1、#2及#3三種的修正後誤差較低，平均誤差約在10%左右。

4. 填充氣提塔對水中VOCs的去除效率

a. 氣液負荷對填充塔去除效率的影響

一般來說，增加液體負荷、明顯增加容積總質傳係數值，四種填充物有共同的結果，這是由於液體截留增加而使有效質傳面積擴大，故 K_{La} 值增加。在同一液負荷下，增加氣體負荷，雖然 $(K_{La})_e$ 值也增加，但並不如增加液負荷的結困明顯。Au-Yeung (1983)等認為 K_{La} 跟氣體負荷無關，尤其是對於高揮發性的物質如 O_2 及 CCl_2F_2 。由於氣體負荷增加使氣膜厚度減少，但對液體截留量並無顯著的增加(Shulman 1955)，即對於有效質傳面積“a”無明顯擴大，除非操作達到負荷點(loading point)。對於高度揮發性物質，液膜阻力為主要的質傳控制步驟，故 K_{La} 的影響較大。在實驗中M、C、 $CHCl_3$ 及1, 4-DCB的 $(K_{La})_e$ 就對氣液比的改變較敏感。所以氣膜厚度減低，阻力變小，有利於低揮發性物質的質量傳送。

圖(7)是#1填充物在不同水量及A/W下，1, 1, 1-TCA的 K_{La} 變化情況。實線部份是以第(2)種修正模式模擬的結果，而符號則代表在液負荷 $1.083\sim 3.249(kg/m^2 \cdot s)$ 及各種A/W的實驗結果。1, 1, 1-TCA的Henry's常數在溫度 $20^\circ C$ 時為0.58，屬於揮發度相當大的有機物，故氣體負荷的改變在固定操作流量下 K_{La} 值並無明顯的變化。但在較低的氣液比或更高的液體負荷下， K_{La} 對氣體負荷的變化較明顯。不過在實驗時，A/W少於10時， K_{La} 的誤差顯著增加，當氣提因子(Stripping factor)操作在1或以下時 K_{La} 經常無法計算或變成負值。若把圖(7)轉換成各種氣液負荷下對1, 1, 1-TCA的去除率影響，可得到圖(8)所顯示的變化情形。對於固定的填充物及槽高，在特定的液體負荷下，VOCs的去除率都有限制，更大的氣體流量並無經濟效益。由圖(8)明顯地若以#1填充物來處理1, 1, 1-TCA，當A/W設計在20~30可得到有效及經濟的效果，如Houel (1979)以填充氣提塔處理水中的 $CHCl_3$ 時，認為以A/W=20的處理設計效益不大。因揮發程度較低之有機物，或液負荷增加時，最經濟A/W比(達到去除的平衡狀態的值)也隨之而增加。

b. 四種填充物對水中VOCs氣提處理的影響

圖(9)是填充#1時，部份VOCs的去除率結果，圖中分成水流量為1, 2及3(1/min)

三部份，而實線代表由第2種修正模式預測的結果，當液體負荷增加時，VOCs的去除率明顯下降，而揮發度較低之有機物如M.C.因受液體負荷及A/W的影響較大，A/W需超過40才能接近曲線的高原(Plateau)，而 CCl_4 及TCE等較高揮發性物質，在三種水量下，氣液比在20後就幾達到穩定的去除效率。所以對較低揮發性的物質除A/W要提高外，槽塔的高度要增加才能達到較高的去除率。模式對於低揮發度物質在低A/W下的預測偏低，但總體來說，馬鞍型填充物的特性，對於液體負荷，氣液比及有機物的揮發度影響仍可由Onda模式預測出來。

四種填充物中，以海膽型具有最大的比表面積，但單位容積填充個數量最少，孔隙率達89.3%，應該是很理想的材料。由實驗中觀察，海膽型填充物容易造成通道效應(channeling)，引導水流由管壁流下，造成嚴重的管壁效應。此外其特殊之結構，易使液體聚積在其「群刺」內，雖然有很大的液體截留效果，但卻減低了有效質傳面積及液體交換率，而造成流體短路情況。所以此種填充物不適合用於高氣液負荷的設計下，但在低氣液比及液體負荷下，不失為經濟的材料。

5. 以填充氣提塔處理自來水中THMs

a. 容積總質傳係數實驗值(K_{La})_e與修正Onda模式模擬值(K_{La})_n

利用修正Onda模式模擬值(K_{La})_n可得較接近(K_{La})_e的結果，圖(10)是四種THMs以Saddles填充物所處理的實驗及模擬關係。

四種THMs的(K_{La})_e以 $CHBr_3$ 最接近預測值，誤差均在13%內。預測值與實驗值的平均誤差為14.74%，標準差13.25%，最大誤差是59.30%而最小誤差則只有0.20%，78%數據的誤差低於20%。

本實驗利用較大型的填充塔來處理THMs，Henry's常數除 $CHCl_3$ 外均較前8種VOCs的低。故證明所建立的經驗公式，也可適用於模塔放大設計及可模擬具較低Hc值的VOCs，即外差在 $Hc=0.1\sim 0.11$ 值。此外較高的液體負荷，此修正模式仍可應用。

據Wallman(1986)研究填充氣提塔的放大設計，發現管壁效應(Wall effect)在小型反應模內較為嚴重。Treybal(1980)建議實驗使用的槽塔直徑(dt)跟填充物直徑(dp)比應在15:1，而每當槽高大於3~10倍槽直徑，或高6~7m時應在槽內加裝散水板。但據Wallman(1986)的實驗結果，填充1吋之馬鞍型填充物，由 $dp=6:1$ 下，所得之 K_{La} 值較12:1及24:1的大；而對於2吋的Tri-Packs填充物，由此例3:1至12:1下，實驗所得的 K_{La} 值卻無明顯的變化。故不同類型填充物，要使 KLa 值達到穩定的dt:dp比有很大差異。但一般認為在實驗室所求得的參數是較保守的設計值。

6. 各種 THMs 的去除與模塔高度的關係

由公式(4)，代入 K_{La} 值及要求的去除率，可計算出槽塔高度。圖(11)是實驗及模擬之 K_{La} 值，在固定氣體流量及不同液體負荷，計算在50%去除率要求下，前三種THMs的槽塔高度。由於CHBr₃在液負荷大於 $3.11(\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，因氣提因子太小(0.39)，質傳受到限制，故槽塔高度要求在無限高，才能達到50%去除率的要求，所以CHBr₃的計算結果沒有繪於圖內。

當液負荷增加時，愈低揮發VOCs者槽塔高度上升愈快。但較高揮發性的槽塔增幅較緩慢。故一般經濟的設計，以水流量愈大愈便宜，但要視乎槽塔的負荷點(Loading Point)，避免發氾濫(Flooding)的錯誤。揮發度愈低的有機物，要求的槽塔的高度就愈長，如在 $L_m=5.117(\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，去除50%CHBr₂Cl要求的槽塔高度是CHCl₃的3倍多。對於CHBr₃來說，槽塔的要求高度更可觀。

若固定A/W值，槽高隨液負荷變化的增幅較緩。圖(12)是以模式模擬在更大的液體負荷下，A/W固定在40時，當去除率提高到90%時，四種THMs的槽塔要求高度。明顯的CHBr₃要求的槽塔高度對前三種THMs的高出甚多。故高去除率的設計對低揮發性物質並不經濟。據U.S.EPA(1988)的報告，當PCB(Hc=0.01)的氣提去除率由50增至90%時，A/W由110增加為170，而槽高則由7.6上升至25.0(ft)，除了要增加氣體量外，也造成槽內壓力損失的增加，而降低了經濟效益。

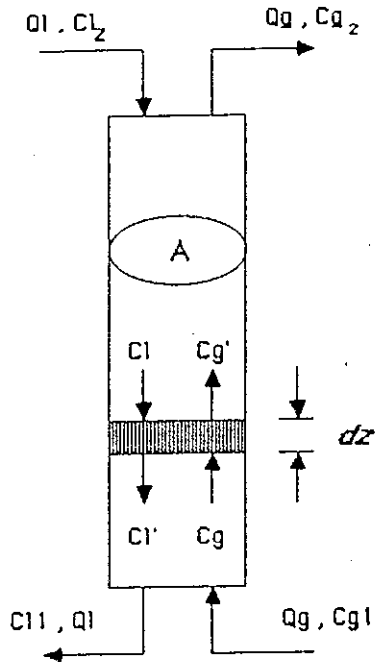
伍、結 論

1. 填充式氣提塔對水中揮發性具有良好的處理能力，而且結構簡單操作容易，適合做為前處理程序，可經濟有效地去除大部份VOCs。
2. 填充物選擇對處理效果有很大影響，四種填充物中，以馬鞍型(#1)的容積總質傳效率最大，而以海膽型(#4)的效率最低。故不能單就填充物的比表面積來決定其處理效率。
3. Onda模式對於本研究中四種填充物的預測結果均偏高，以#1及#2的結果較接近，但可經由統計迴歸分析，可得到良好的修正。
4. 由槽塔放大實驗結果可驗證修正Onda模式的適用性，故放大結果對#1填充物的質傳效果並無明顯的影響。
5. THMs的去除率愈大，則相對地槽塔高愈長及A/W值須愈大始能合乎要求；四種THMs中以去除CHBr₃的所需槽塔高度最大，顯示填充氣提塔對於低揮發度物質的處理並不合乎經濟效益。

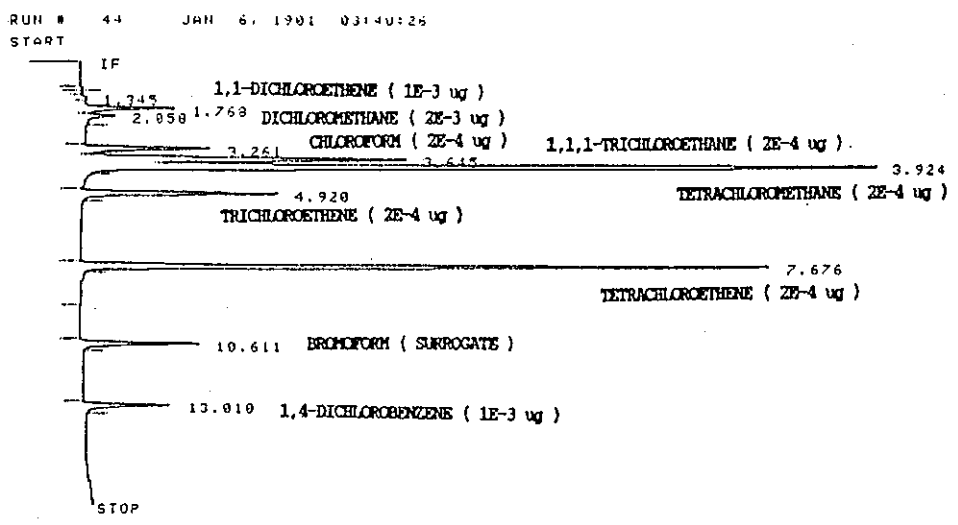
陸、参考文献

1. Au-Yeung P.H. & Ponter A.B. (1983) "Estimation of liquid film mass transfer coefficients for randomly packed absorption columns", Can. J. Chem. Eng., 61, pp.481-493.
2. Clark R.M., Fronk C.A & Lykins Jr.B.W (1988) "Removing organic contaminants from groundwater", Envir. Sci. & Technol., Vol.22, No.10, pp.126-1129.
3. Gosset J.M., Cameron C.E., Eckstrom B.P., Goodman C. & Lincoff A.H. (1985) "Mass transfer coefficients and Henry's constants for packed-tower air stripping of volatile organics: measurements and correlation", ESL-TR-85-18.
4. Hand D.W., Crittenden J.C., Gehin J.L & Lykins Jr. B.W. (1986) "Design and evaluation of an air-stripping tower for removing VOCs from groundwater", J.AWWA, Sept., pp.87-97.
5. Houel N., Person F.H. & Selleck R.E.(1979) "Air stripping of chloroform from water", J.EE. ASCE, Vol.105, August, pp.777-781.
6. Kavanaugh M.C. and Trussell R.R., (1980)"Design of aeration towers to strip volatile contaminants from drinking water", J.AWWA, December, pp.684-692.
7. Keith L.H., Garrison A.W., Allen F.R., Carter M.H., Floyd T.L., Pope J.D. & Thruston Jr. A.D. (1980) "Identification of organic compounds in drinking water from thirteen U.S.cities", Water Chlorination Environmental Impact & Health Effect Vol.3, chap.22.
8. Lalzary S., Pirbazari M., McGuire M.J. & Kransner S.W. (1984) "Air stripping of taste and odor compounds from water", J.AWWA, March, pp.83-87.
9. Harriott P. (1989) "Effect of liquid maldistribution on the performance of packed stripping columns", E.S. & T., Vol.23, No.3, pp.309-313.
10. McCarty P.I. (1980) "Organics in water -an engineering challenge", J.EE. ASCE, February, pp.1-17.

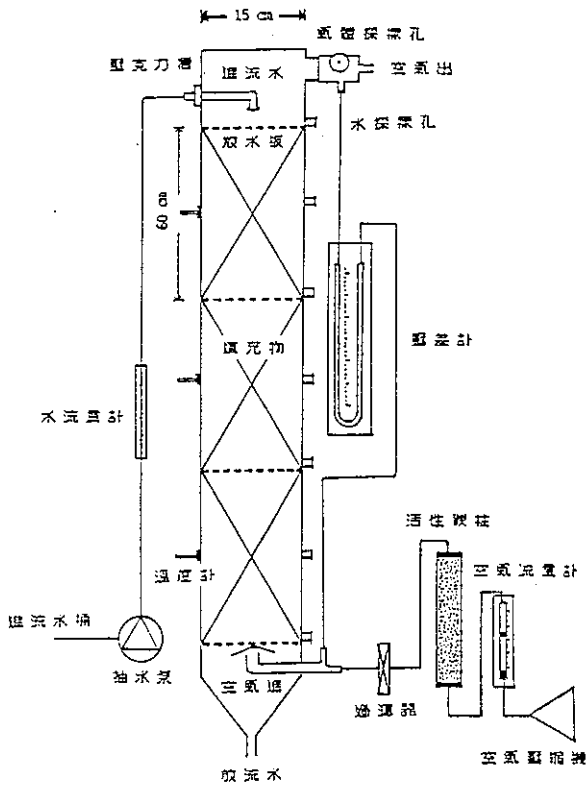
11. McKinnon R.J. & Dyksen J.E. (1984) "Removing organics from groundwater through aeration plus GAC", J.AWWA, May, pp.42-47.
12. Onda K., Takeuchi H. & Okumoto Y. (1968) "Mass transfer coefficients between gas and liquid phases in packed columns", J.Ch.Eng. of Japan, Vol.1, No.1, pp.56-62.
13. Pontius F.W. (1990) "Complying with the new drinking water quality regulations", J.AWWA, February, pp.32-52.
14. Shulman H.L., Ullrich C.F. & Wells N. (1955a) "T. Total, static, and operating holdups", A.I.Ch.E.J., Vol.1, No.2, pp.247-253.
15. Treybal R.E. (1980) "Mass-Transfer operations", McGraw-Hill chemical engineering series.
16. Umpres M.D., Tate C.T., Kavanaugh M.C. & Rhodes R. (1983) "Trihalomethane removal by packed-tower aeration", J.AWWA, August, pp.414-418.
17. US.EPA (1987) "Air stripping of contaminated water sources-air emissions and controls" EPA/600/3-87-017.
18. US.EPA (1988) "Technologies & costs for the removal of synthetic organic chemicals from potable water supplies" US.EPA Washington D.C.
19. Wetrick J.J., Mello W. & Thomas R.F. (1984) "The groundwater supply survey", J.AWWA, May, pp.52-59.
20. Willman H. & Cummins M.D. (1986) "Design scale-up suitability for air-stripping columns", Public Work, October, pp.74-78.
21. Wilke C.R. & Chang P. (1955) "Correlation of diffusion coefficients in dilute solutions", A.I.Ch.E. Jour., Vol.1, No.2, pp.264-270.
22. 洪崇軒(1989) "自來水中微量揮發性有機物之生成與控制—逆滲透薄膜法", 台大環工碩士論文。
23. 蔡秋華, 郭錦洛(1988) "台灣北部地區地下水氯化烴化合物污染物調查", 地下水資源研討會論文集pp384-401。
24. 馬健雄(1990) "以填充式氣提塔處理水中揮發性有機物", 台大環研所碩士論文。



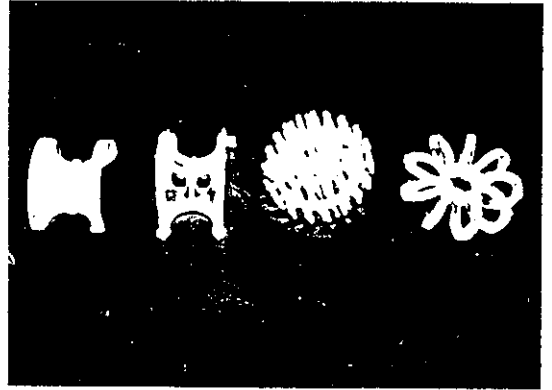
圖(1) 對流式填充氣提塔之氣液質量傳送



圖(2) 8種VOC_s的標準圖



圖(3) 填充氣提塔之構造



圖(4) 四種填充物的外型
(由右至左分別是#1、#2、#4與#3)

表(1)填充物之特性

填充物編號	1	2	3	4
中文名稱	馬鞍型	馬鞍齒型	梅花型	海膽型
英文名稱	Intalox Saddle	Super Intalox Saddle	Tellerette	Hedgehog
尺寸(吋)	1"	1"	2"	2"
材質*	PP	PP	PP	PP
比表面積(m^2/m^3)	256	207	185	300
充填個數(個/ m^3)	84000	55000	325000	20600

*PP : POLYPROPYLENE

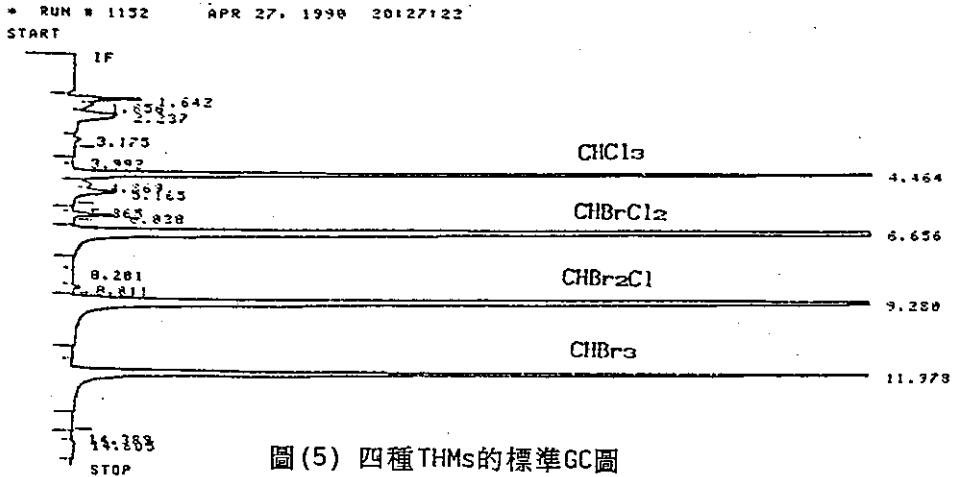
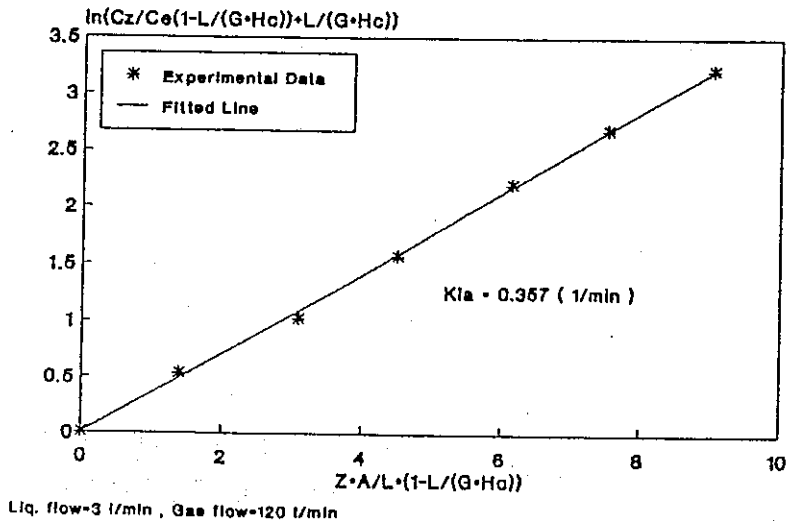


表2 K_{La} 實驗值的各種操作條件組合

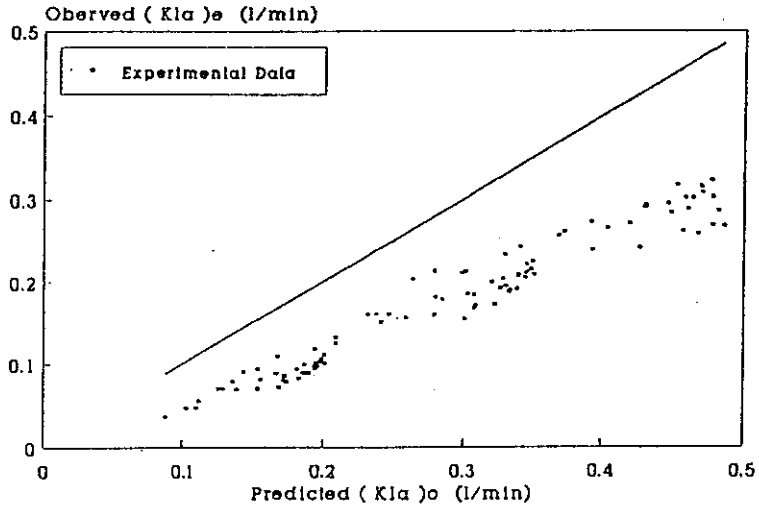
實驗參數	馬鞍型 (#1)	馬鞍齒型 (#2)	梅花型 (#3)	海膽型 (#4)
水力負荷 ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)	1.083~3.249	1.083~3.249	1.083~3.249	1.083~3.249
氣液比 (A/W)	10~50	10~40	10~40	10~40
溫度	20	20	20	20
VOCs種類數	8	8	8	8

FIND K_{La} BY EXPERIMENTAL DATA
 1,1-DCE, Saddle(#1), Temp=20 C
 Line: $Y = -0.009 + 0.367 \cdot X$ $R\text{-sq} = 0.99908$



圖(5) 由實驗中求取容積總質傳係數(K_{La})_e

PREDICTED $(K_{La})_o$ & OBSERVED $(K_{La})_e$
#2 : Super Inalox Saddles

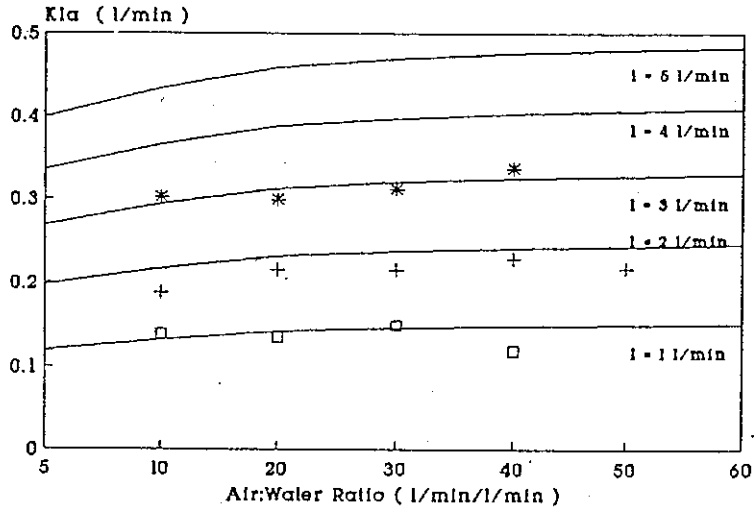


圖(6) $(K_{La})_e$ 及 $(K_{La})_o$ 值(馬鞍齒型 #2)

表(3) 實驗容積總質傳後數 $(K_{La})_e$ 與 $Onda(K_{La})_o$ 之關係迴歸結果

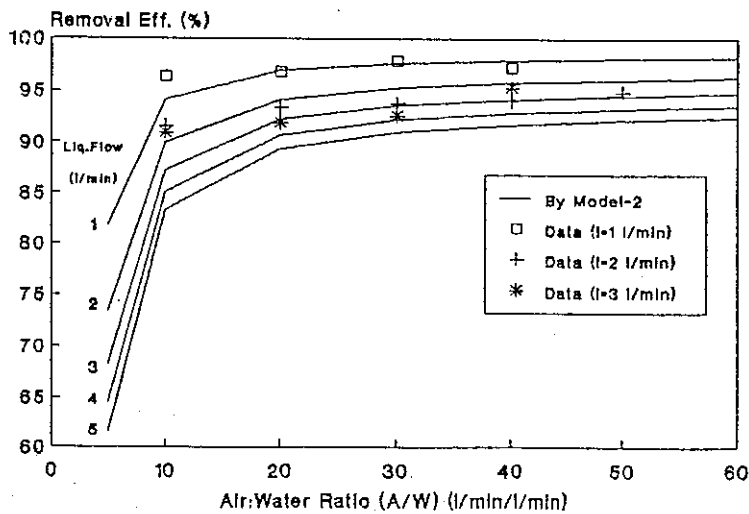
填充物 種類	模式(I)*		模式(II)**		模式(III)***	
	X	n	A	B	λ	γ
馬鞍型 #1	0.625	0.817	0.022	0.715	0.774	0.887
	R-sq=0.8142		R-sq=0.8857		R-sq=0.5993	
馬鞍齒型 #2	0.771	1.219	-0.026	0.693	0.575	0.558
	R-sq=0.9598		R-sq=0.9526		R-sq=0.5581	
梅花型 #3	0.399	0.533	0.078	0.441	0.436	3.263
	R-sq=0.6459		R-sq=0.6635		R-sq=0.9361	
海膽型 #4	0.289	0.483	0.103	0.201	0.265	2.092
	R-sq=0.5515		R-sq=0.3884		R-sq=0.8975	
* 模式 (I)	$(K_{La})_e = x = (K_{La})_o^n$					
** 模式(II)	$(K_{La})_e = A + B = (K_{La})_o$					
*** 模式(III)	$\frac{(K_{La})_e}{(K_{La})_e} = \left(\frac{1}{\lambda} - 1\right) * \frac{(K_{La})_o}{(K_{La})_o} + \left(\frac{1}{\lambda} - 1\right) * \frac{(K_{La})_o}{(K_{Ga})_o * H_c}$					

PREDICTED & OBSERVED - K_{La} -
1,1,1-TRICHLOROETHANE (#1)

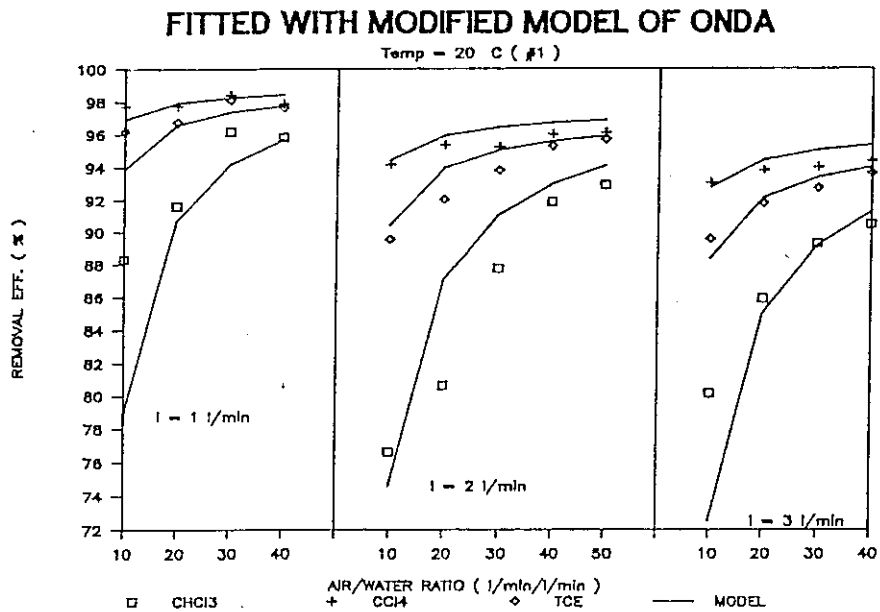


圖(7) 各種氣液負荷下 K_{La} 之變化情形

PREDICTED & OBSERVED REMOVAL EFFICIENCY
1,1,1-TCA, Packing : Saddles (#1)

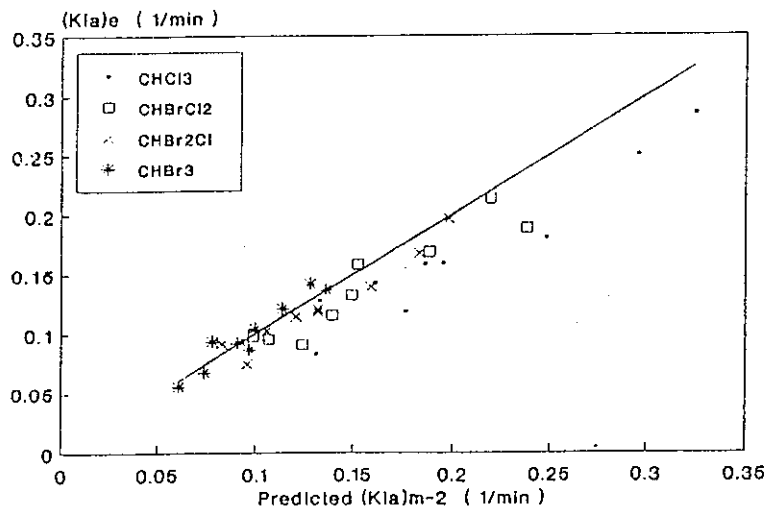


圖(8) 各種氣液負荷下1, 1, 1-TCA的去除率變化情形



圖(9) #1填充物對各種VOCs氣提的效率

PREDICTED $(K_{La})_{m-2}$ & OBSERVED $(K_{La})_e$
#1: *Saccharis*



圖(10) THMs的 $(K_{La})_{m-2}$ 值與 $(K_{La})_e$ 之結果

PT HEIGHT REQUIRED TO REMOVE 50% THMs
Gas Loading - 0.06603 (kg/m²/sec)

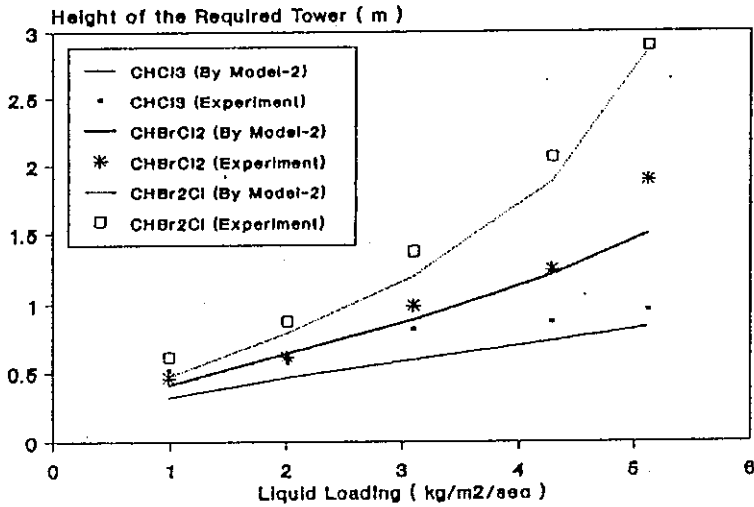
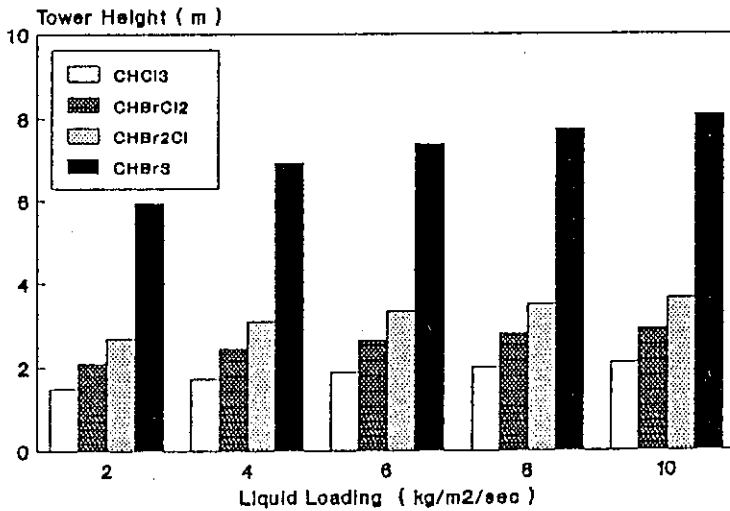


圖 (11) 50% THMs 去除率要求下的槽塔高度

TOWER HEIGHT REQUIRED TO REMOVE 90% THMs
Predicted By Modified Onda's-(2), A/W-40



Packing : Saddle (#1)

圖 (12) 不同氣液負荷下，四種 THMs 90% 去除率的槽塔模擬高度